

# 3D 集積技術概要

## Three Dimensional Integration Can It Open New Paradigm in Semiconductor Technology and Industry?

益 一哉  
Kazuya MASU

東京工業大学ソリューション研究機構  
Solutions Research Laboratory, Tokyo Institute of Technology

### 【1】はじめに

CMOS 集積回路は平面的な寸法を微細化することで、高性能化し、さらに同一機能ならチップ面積が低減するという低コスト化を実現することで、最初のマイクロプロセッサが生まれた 1970 年以降 40 年以上の長きにわたり情報化社会進展を支えてきた。しかし、微細化だけを追及した技術トレンドだけではどうもこれからの社会の動きや産業動向を見誤りそうな状況である。

本稿では、CMOS 集積回路技術トレンドを種々の観点から見ることで、これからの集積回路技術研究のみならず、製造技術や情報化社会の進展について議論し、そのひとつとしての三次元集積技術の意義を考えてみたい。

### 【2】CMOS 微細化トレンド

図 1 及び 2 に集積回路技術微細化トレンドを示す。良く知られた最小寸法や遮断周波数、MPU 上のトランジスタ数やクロック周波数を示している。集積回路研究者であれば良く見慣れた図なのであまり感激はないかもしれないが、縦軸が対数になっていることに今一度着目していただきたい。集積回路技術のために星の数ほどの革新的技術があり、対数軸での性能向上を達成してきた。しかし、図 2 の MPU のトレンドを見るとクロック周波数はおおよそ 3.8GHz で飽和し、また MPU 上の gate 数もばらつき始めたことがわかる。単純に微細化して高性能化するという技術が主ではなく、使われるところを想定した集積回路が求められたことを反映している。事実、2000 年代からのワイヤレス技術の発展はプロセッサに関しては幅広い性能、すなわち性能追及型、低消費電力追及型、コスト追及型など種々なプロセッサが市場に出回っている。

図 3 は DRAM 及び Flash の容量トレンドである。DRAM は Gbit を越えるあたりから従来型の容量トレンド上での議論よりも、周辺とのアクセスが問題視されるようになってきている。容量トレンドをそのまま維持したのは Flash であり、トレンドだけを見るとあた

かも Flash が DRAM の代わりになったように思える。

ここで、半導体産業が GDP に占める位置づけを再確認してみよう。図 4 は Worldwide でみた半導体市場である。半導体市場は GDP 比にすると 1% 以下であるが、あくまでもこれは半導体だけのことであり、半導体や集積回路技術の与える社会的インパクトは計り知れないことは言うまでもない。名目 GDP は一定量の成長があるのに対して、半導体生産高は 1995 年でその傾きが明らかに変化していることに注目すべきである。結果論ではあるが、このあたりから半導体ビジネスが変化していることに気づくべきだった。技術者や研究者の多くが、半導体産業や技術開発は DRAM だけではダメで、アジア諸国からも技術に限らずビジネスでも追いつかれ、研究開発スタイルも変化していると認識し始めたのは残念ながら 21 世紀になってからである。技術者のみならず研究者ももっとこのようなトレンドを読むべきであることを教えている。

### 【3】技術進化の変曲点

技術進歩を議論する際に、縦軸を対数で描くと技術の進歩はたいしたことがないように錯覚してしまう。半導体開発に何らかの形で携わった方は、縦軸を対数でプロットしたときの裏に隠された技術開発にどれだけ多くの新規かつ革新的な技術開発があったかを強調したいだろうと思う。まずは、縦軸を対数にプロットしても性能向上を持続させ続けた多くの研究者、技術者には敬意を払うべきであろう。では一步踏み込んで、縦軸対数プロットして、その傾きをより大きくした事例はあるのだろうか？ [図 5] 技術開発においてはイノベーションと言えるのであろう。Technological innovation と後世で認識される技術である。思いつく技術として、磁気記録における垂直磁気記録技術と光ファイバ通信における WDM (波長多重技術) をあげることができそうである。

図 6 では半導体メモリのトレンドグラフ上に磁気記録の記録密度トレンドをプロットしている。磁気記録に関しては、1990 年頃から記録密度トレンドに変曲点

がある。磁気記録技術における垂直磁気記録が実用化されて製品に投入されたのは 2005 年頃からであるので 1990 年の変曲点は垂直磁気記録が産み出したものではなく、高性能磁気ヘッド開発や信号処理技術など複数の技術の合わせ技であるらしい。この観点から、垂直磁気記録は横手記録では物理的に限界を迎えていた記録密度向上を 2005 年以降も可能にした点にあると言われている。この当たりの考察は東北大村岡裕明教授に口頭で伺った範囲であるので、一度詳細に調査したいと思っている。

光ファイバ中のデータ伝送に関しては、伝送密度を飛躍的に向上させた技術として WDM (Wavelength Division Multiplex) が知られている。図 7 に示すように明らかに伝送レートの向上には変曲点を与えている。図 8 は World wide のインターネットトラフィックである。これも縦軸対数で増加している。1990 年から 95 年にかけては、情報スーパーハイウェイという用語が飛び交い、WWW (World Wide Web) が立ち上がった頃である。米国大統領 (クリントン) の web でペットの猫の鳴き声を聞いたといった話題もあったころである。このような動きの中で技術的には WDM がインターネットトラフィックの増大に寄与したと予測される。ただし、米国内では ADSL が主であったため、どれだけの寄与があったかは検証が必要であろう。

従来と異なる技術開発、技術分野におけるイノベーションと思われる技術が社会に大きなインパクトを与えた事例については今後も調査検討が必要である。

図 4 に示したように 1995 年頃から半導体生産量は名目 GDP の伸びとほぼ同じとなっている。この頃から「如何に作るか」ではなく「何を作るのか」を考えられるようになったと記憶する人もいるであろう。

集積回路技術開発においても、単に微細化だけではなく、異種な機能を集積する、或いは平面的な微細化だけではなく三次元的に積層して性能向上を目指すという新技術軸の議論が始まったのも 2000 年頃からである。異種な機能の集積が如何なるイノベーションに繋がるかを考えてみる。

#### 【4】 異種機能集積技術と破壊的イノベーション

ITRS ロードマップでは、図 9 に示す技術軸として微細化 (Miniaturization, or More Moore) と異種な機能集積 (Integration with diverse functionalities, or More than Moore) が示されている。微細化軸は少なくとも加工寸法に関連する数値が記述されているので分かり易い。一方で、異種機能集積軸 (図 9 の横軸) は数値が入っておらず、項目だけが羅列されているだけで軸と呼ぶことも難しい。ただ、微細化に依らない高機能化軸があって良いはずだと示した功績はあるだろう。ここでは異種機能集積と述べたが、Diversification (多様化) 軸と言ってもよいかもしれない。

CMOS 技術屋から考えると、CMOS と全く違うもので高機能化を考えるよりも、CMOS 集積回路に何かプラスすることによる技術軸を考えてみたい。例えばこれまで Discrete に開発されてきた MEMS やセンサと集積回路技術が雄三すれば新たな世界を切り拓けると予想できる。CMOS 集積回路にプラス  $\alpha$  するのか、何かの機能に CMOS 集積回路がプラス  $\alpha$  されるのかといったことも考える必要はあるだろう。多くの場合 (あくまでも多くの場合) は MEMS やセンサは CMOS プロセスと親和性が高いといえるだろう。

集積回路が社会に大きなインパクトを与えたのは、設計者は集積回路プロセスを知らなくても回路設計するだけで所望の回路を手にいれることができるためである。集積回路開発においては、シャトルサービスを利用して回路開発を行うことがある。レチクルは 15mm 角程度であるが、開発段階で単一目的の回路で 15mm 角全部を設計することはほとんどない。多くの場合は複数のプロジェクトで乗り合いで設計して、試作評価する。これがシャトルサービスである (図 9)。設計者は数 mm 角のチップを受け取り、評価する。チップでしか受け取れないのは他の設計者の設計したチップとの IP コンタミを防ぐためである。さて、CMOS 回路が搭載されたチップ上への MEMS などの機能集積を考えてみる。数 mm 角チップ上へ何かを作り込もうとすればレジスト塗布をしなければならないし、薄膜堆積やエッチングもしなければならない。しかし、残念ながら数 mm 角のチップにプロセスを施すことはほとんど不可能である。極論すればレジストも均一に塗布することはできない。時自分の設計した部分だけが形成されたウエハが入手できれば CMOS 回路上にプロセス技術者は望む機能を製作することができ、機能集積 CMOS 回路開発を容易に進めることができる。そのために開発したのが図 10 の「ウエハシャトル技術」である。ここでは NTT-AT が開発した埋込技術を利用して例えば設計者 A は自分の設計した以外の部分が平坦化マスキングされた状態のウエハを入手できる。従来、他人の設計部分を Laser Abbreviation で飛ばしてしまうことで他人回路を見えなくする技術があったが、それではウエハ表面は平坦ではなくレジストもまともに塗ることが出来ない。

ウエハシャトル技術による乗り合い設計は 2011 年から始まり、まず 0.35  $\mu$ m CMOS プロセスで実施された。我が国では 7 大学が参加して行われた。現在、180nm CMOS を利用したシャトル技術を推進中である。このウエハシャトルを発展させるためには、回路技術者とプロセス技術者の Collaboration が必要であり、そのためには基本回路ライブラリを如何に共用化するなどの方策の整備が必要である。これについては現在筆者の在籍する東京工業大学異種機能集積研究センターで鋭意推進しているところである。

さて、この技術がイノベーションを産み出す観点からはどうなるかを考察してみる。現在シャトルサービ

スで回路試作は 40nm や 28nm CMOS 集積回路を試作可能である。この観点において 0.35 $\mu$ m や 180nm CMOS はかなり性能の落ちたプロセスであるとも言える。性能を落としてもイノベーションを興す可能性はあるのだろうか？

1997 年のクリスチャンセン教授の「破壊的イノベーション Disruptive Innovation」にその答えの一部をみることができる。

図 1 1 に元祖破壊的イノベーションの模式図と異種機能集積技術の関係を示す。図 1 2 は破壊的イノベーションの例として知られているものである。元祖・破壊的イノベーションの本質は、持続的な技術革新が起こるのだが、ある時点 (①) で多くのマーケットが要求する仕様よりも明らかに劣るかもしれず、かつローエンドマーケットにも見向きもされない開発 (②) を行う事にある。誰しもが馬鹿にするような技術であることが多い。しかし、持続的な技術進歩はローエンドマーケットを十分満たし (③)、いずれハイエンドマーケットも席卷するというモデルである。さらに言えば、①から持続的に進化した技術はオーバースペックになり市場から駆逐されてしまうと云う。

研究開発レベルで、CMOS 集積回路に MEMS を搭載する技術は、CMOS 回路とみても現状レベルではかなり低いものであり、MEMS も MEMS 技術分野から見ると明らかに性能が低い可能性がある。まさに破壊的イノベーションモデルにおいては②に相当すると云える。しかし、持続的な技術開発と性能向上は誰にでも開発できる CMOS/MEMS 技術は破壊的イノベーション的要素を持っていると云える。

## 【5】三次元集積技術

これまでの考察を元に本題の三次元集積技術について考える。

三次元技術開発については特許的には 1968 年に遡ると言われている。我が国では 1980 年代に 10 年をかけたプロジェクトが推進され、基盤技術としての成果を数多く挙げた。平成 20~24 年度に NEDO ドリームチッププロジェクトが推進された。その成果発表回は web で入手可能である。

[http://aset.la.coocan.jp/kenkyu/kenkyu\\_sanjigen\\_index.html](http://aset.la.coocan.jp/kenkyu/kenkyu_sanjigen_index.html)

応用展開を見据えた要素技術開発に多くの成果を挙げた。一方で三次元集積技術のインパクトを門外漢にわかる図面がない。

大場隆之教授 (東京工業大学) の図面が単純であるが重要である。図 1 3 に示すように、積層することでチップの平面的には単位面積当たりの Tr 数増加に変曲点的増加を期待できるという。大場教授を中心とする WoW Alliance では国プロとは違ったアプローチで三次元集積技術の開発をしている。変曲点的な性能向上

を期待したい。

さて、一方で研究開発に着目すると要素技術の進歩的なことに目が奪われるが、既に ISSCC2012、2013 では応用を見据えたチップ開発とデモンストレーションが発表されている。(図 1 4~2 2) 我が国ではどうも要素技術とか基盤技術に注力しそうである。実際に動かすチップ、そして何かに使ってみるという開発が必要である。企業ではすぐに売上げいくらかという質問が飛び交う。むしろ大学などの研究機関での challenging な開発が臨まれる。

## 【6】 これからの社会を念頭におくと・・・

異種機能集積は、何となく面白そうなデバイスや部品ができそうである。何に使うかを考えて見よう。よく出口を考えた開発をしなさいと言われる。

ならばソリューションまで考えて見るとうことで、技術階層をプロットしたのが、図 2 3 である。ソリューションまでを考えると気の遠くなるほど遠いことがわかる。ボトムアップ的に考えると明らかに限界がありそうである。イノベーションとは、社会インパクトを与えるところにまで昇華してイノベーションと称するならば、Material innovation や Device innovation といった Technological innovation に繋がるまでにはかなりの道のりが必要であることを再認識せねばならないだろう。

であるならば、いっそのことこれからの社会がどうなるかから考えて見ることにする。最近クラウドとか、ビックデータと言った単語が飛び交っている。

ならばボトムアップ的に考えるのではなく、社会の変化から考えて見ることにする。

90 年台からのネットワークに繋がるものを記述しただけの図であるが、あらゆるモノがインターネットに繋がるようになって来た。技術的観点からは、あらゆるモノがインターネットに接続され、お互いにコミュニケーションし始める。「群」的な行動をすることになる。センサネットワークの進化形である。

- ① 環境からエネルギーを収受し、
- ② 何かをセンシングして、
- ③ 周りとのコミュニケーションし、
- ④ 機能を発現する。

と考えてこれを「Swarm Electronics」と称した。(これは、2012 年 10 月に東工大、東大、名古屋大、広島大学の有志が集まって定義した。) これでもまだ部品の発想である。

図 2 4 のようにあらゆるものがインターネットに繋がれば、個人のあらゆる情報もクラウドに載るだろうと考えると、よく言われているライフログがとれるようになる。経済学の人はこの膨大な個人データが大企業に独占されない方法を考える。あるいは、個人のデ

ータを収集する、あるいはそれを使うと云う発想から「超多様性世界」が生まれると言うようなことを予想する。

超多様性時代のモノづくりを考えよう。我々の得意とするところになるだろう。これまでの半導体製造は少品種大量生産でしか成功していないことは良く認識されていることである。超多様性社会こそ、多品種少量生産的な技術開発と製造技術が求められる。

多品種少量生産的な技術開発として、異種な機能を集積するという意味では、先に紹介したウエハシャトル技術（東工大と NTT-AT が開発）がその一例であろう。多品種少量生産技術として、最近急激に実用化技術として立ち上がった 3D プリンタに学ぶことができるだろう。また、エレクトロニクス分野ではプリンタブルエレクトロニクスと称して、プリンティング技術によって回路を作ろうという動きがある。単に回路だけではなく、機械的な構造や機能までもプリンティング技術で作るという発想があっても良い。3D プリント、プリンティングエレクトロニクスの発展系としての「機能プリンティング： Functional printing」という技術があって良いはずである。究極の多品種少量生産技術である。

実は我が国には多品種少量生産に強い分野がある。アパレルとアニメである。生産数 50-500 で十分ビジネスになっている。Functional printing は 50-500 程度の少量生産でのビジネスを可能にするだろう。さらに言うならば、多品種少量生産で成功した技術や製品が大量生産でも成功するように、「多品種スケラブル生産技術」を産み出すことも求められるだろう。こういった発想が、おそらく Cyber Physical System 実際における新たなモノづくりに繋がると考えている。

## 【7】おわりに

集積回路技術の進化を概観して、これからの Cyber Physical System 時代の開発、製造技術のあり方にまで何とか辿り着くストーリーを構築してみた。三次元集積化技術の今後の発展が如何に寄与できるかまでは見通せていない。ビジネスを考えて研究開発をしる良くいわれる。

Steven Paul Jobs 氏が亡くなって以来、Apple 社はあまり面白い製品を生み出してない。彼らは製造技術的には少品種大量生産の iPhone、iPad、iPod で成功したといえるが、彼らのビジネス戦略は一体何であったかの考察を踏まえないと、Jobs 氏の本質を見誤ることになる。今回は詳細を省略するが、Jobs 氏の成功の源泉は既得権益に対する飽くなきチャレンジ精神とそれを支えて設計技術にあると考えている。アップルのこれまでのビジネス的ばかりではなく技術的な成功の要因の考察なしに、「多品種スケラブル生産技術」の生き残る道を見出すことはかなり厳しい。こういった観点まで考えねばならないと思うと気が遠くなるが、避けては通れないだろう。

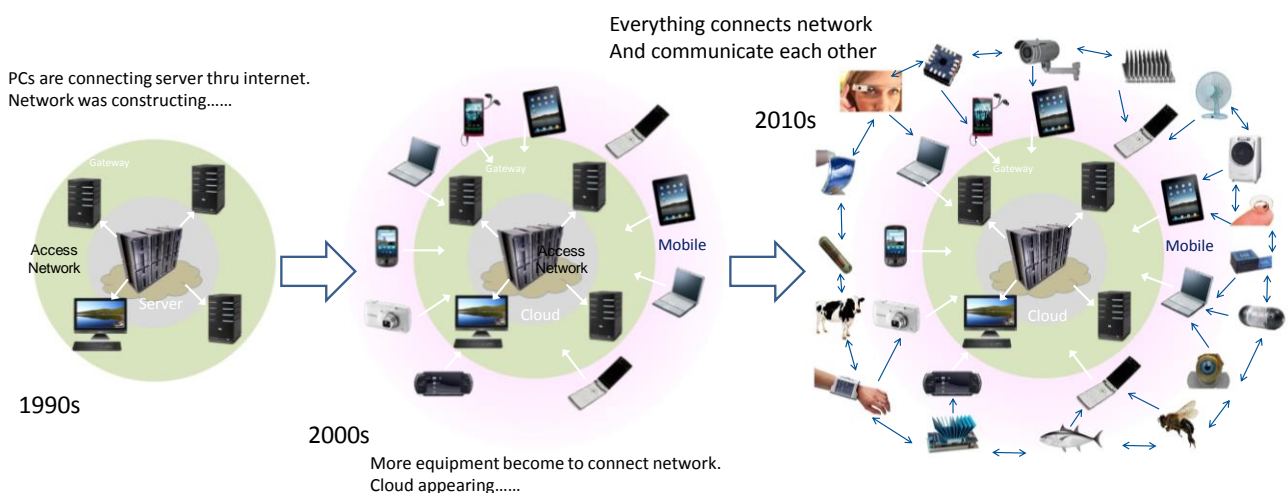


図 2 4 あらゆるモノがインターネットに接続するようになってきた。  
Fig. 24 Everything becomes connect internet/cloud.